

IMPACTO ECONÓMICO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN EL SECTOR
INDUSTRIAL

OSCAR JULIAN CASTILLO MARTINEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI
2008

IMPACTO ECONÓMICO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN EL SECTOR
INDUSTRIAL

OSCAR JULIAN CASTILLO MARTINEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
HENRY MAYA
Ingeniero Eléctrico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI
2008

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electricista.

ROSAURA CASTRILLÓN

Jurado

Santiago de Cali, 30 de Junio de 2008

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. JUSTIFICACIÓN	17
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	18
2.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN	24
3. IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN SOBRE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	29
4. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN LOS TRANSFORMADORES	34
5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN LOS MOTORES	37
5.1 MOTORES DE INDUCCIÓN	37
5.1.1 Picos de intensidad.	38
5.1.2 Picos de par.	39
5.1.3 Pérdida de velocidad mecánica.	40
5.1.4 Calentamiento de los motores	41
5.2 MOTORES SINCRÓNICOS	41

6. MÉTODOS Y PROCESOS EXISTENTES PARA LA MITIGACIÓN DEL EFECTO DE LOS HUECOS DE Tensión	43
6.1. ACCIONES PREVENTIVAS	45
6.1.1 Diseño e instalación.	45
6.1.2 Operación de las instalaciones	46
6.2 ACCIONES CORRECTIVAS	46
6.3 SISTEMAS PARA LA MITIGACIÓN DE LOS HUECOS DE Tensión	47
6.3.1. Rueda volante	47
6.3.2. UPS estática con mínimo almacenamiento de energía	48
6.3.3. Restaurador dinámico de voltaje	49
6.3.4. Conexión de máquina síncrona de respaldo	49
6.3.5. Compensador estático de reactivos	50
6.3.6. Inyección de transformadores en serie	50
7. OBTENCIÓN DE VALORES DE REFERENCIA DE COSTOS DE LAS PÉRDIDAS A CAUSA DE LOS HUECOS DE Tensión EN TRANSFORMADORES Y MOTORES	53

7.1 CARACTERIZAR COMPORTAMIENTO DE CALIDAD DE POTENCIA DEL SISTEMA	54
7.2 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN	54
7.3 CARACTERIZAR EL COSTO Y EFICACIA PARA ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	60
7.4. COMPARATIVO PARA LLEVAR A CABO EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO	61
8. CONCLUSIONES	63
9. RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFIA	65

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Caracterización de un hueco de tensión	19
Gráfica 2. Causas de los Picos de Voltaje	20
Gráfica 3. Ilustración de un área de la vulnerabilidad	27
Gráfica 4. Curva ITIC	29
Gráfica 5. Zona de protección para semiconductores (SEMI F47)	32
Gráfica 6. Intensidad en el primario de un transformador de tres columnas ante huecos de tensión tipos A y G.	34
Gráfica 7. Variación de la corriente en un motor de inducción en presencia de diferentes huecos de tensión.	39
Gráfica 8. Variación del par de un motor de inducción en presencia de diferentes huecos de tensión.	40
Gráfica 9. Sensibilidad en la velocidad a huecos de tensión en un motor reinducción	40
Gráfica 10. Derrateo en motores por desbalance de tensión	41
Gráfica 11. Esquema general de una Rueda volante	48
Gráfica 12. Diagrama de bloques de una UPS	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de huecos de tensión y sus respectivas características	22
Tabla 2. Tipos de hundimiento según la falla y la conexión de la carga	24
Tabla 3. Estadísticas de fallas en el sistema de de distribución	25
Tabla 4. Caracterización de acuerdo al criterio de severidad del Hueco de tensión.	26
Tabla 5. Tolerancia a la tensión de varios equipos	33
Tabla 6. Transformación del tipo de hundimiento en el devanado secundario del transformador	36
Tabla 7. Ejemplo de interrupción según conexión del transformador	36
Tabla 8. Porcentaje cortes reducidos por diferentes dispositivos de mitigación tomando diferentes estadísticas y diferentes inmunidades iniciales de procesos.	52
Tabla 9. El costo de la mala calidad en Europa	56
Tabla 10. Ejemplo factores de peso para diferentes magnitudes de huecos de tensión en Estados Unidos	58
Tabla 11. Ejemplo de combinación de factores de peso con el rendimiento de huecos de tensión esperados para determinar costo total de las variaciones de calidad de potencia en Estados Unidos	59

Tabla 12. Costos típicos de tecnología utilizados para mitigar los efectos de los huecos de tensión.

RESUMEN

El trabajo analiza el impacto de los huecos de tensión en la calidad de la energía a partir de las consideraciones actuales sobre el tema y de su caracterización, clasificación y sus orígenes. Se abordan los métodos de mitigación y las curvas de tolerancia de voltaje como herramientas que dan una idea de la sensibilidad de los equipos a estos eventos. Finalmente se analiza con referencias y valores económicos, cómo se ve afectada la economía en la industria a nivel de todas las cargas.

GLOSARIO

ALTA TENSIÓN (AT): corresponde a tensiones mayores o iguales a 57,5 kV y menores o iguales a 230 kV. (Retie¹).

BAJA TENSIÓN (BT): los de tensión nominal mayor o igual a 25 V y menor o igual a 1000 V. (Retie¹).

CALIDAD DE LA POTENCIA (CP): es un término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el suministro de corriente alterna en las instalaciones eléctricas, en términos de las variaciones de la tensión, la forma de onda sinusoidal y la frecuencia

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (CEI): Es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Numerosas normas se desarrollan conjuntamente con la ISO (normas ISO/IEC).

COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (CEM): se denomina Compatibilidad Electromagnética a la aptitud de un aparato o de un sistema para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético, y sin producir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo lo que se encuentre en dicho entorno.

CONDENSADOR O CAPACITOR: es un dispositivo que esta formado por un par de conductores, generalmente en forma de placas, esferas o láminas, separados por un material dieléctrico (siendo este utilizado en un condensador para disminuir el campo eléctrico, ya que actúa como aislante) o por el vacío, que, sometidos a una diferencia de potencial adquieren una determinada carga eléctrica. A esta propiedad de almacenamiento de carga se le denomina capacidad o capacitancia.

CONSEJO INTERNACIONAL DE GRANDES REDES ELÉCTRICAS (CIGRE): es una Asociación internacional permanente, no gubernamental, sin fines de lucro, fundada en Francia en 1921. Su objetivo es el desarrollo y distribución de conocimientos técnicos en los temas de generación y transmisión de energía eléctrica de alta tensión.

¹ Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Resolución 18 0466 del Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Abril 2 de 2007.

CONTACTOR: dispositivo con capacidad de cortar la corriente eléctrica de un receptor o instalación con la posibilidad de ser accionado a distancia, que tiene dos posiciones de funcionamiento: una estable o de reposo, cuando no recibe acción alguna por parte del circuito de mando, y otra inestable, cuando actúa dicha acción.

CORRIENTE ALTERNA (CA): la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente en forma sinusoidal. Se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a los hogares y a las empresas.

CORRIENTE DIRECTA (CD): es el flujo continuo de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, las cargas eléctricas circulan siempre en la misma dirección desde el punto de mayor potencial al de menor.

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.

IEEE: instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos. Es una asociación Internacional con sede principal en los Estados Unidos, y subseces en más de 150 países del mundo y más de 370.000 miembros organizados geográficamente en diez Regiones, más de 300 Secciones y unas 700 Ramas Estudiantiles.

INTERRUPTOR: el interruptor de potencia es el dispositivo encargado de desconectar una carga o una parte del sistema eléctrico, tanto en condiciones de operación normal (máxima carga o en vacío) como en condición de cortocircuito.

MEDIA TENSIÓN (MT): corresponde a tensiones nominales superiores a 1000 V e inferiores a 57,5 kV. (Retie¹).

PAR MOTOR: es la fuerza que es capaz de ejercer un motor en cada giro.

POTENCIA APARENTE: se expresa en kVA ó MVA. La potencia aparente (también llamada compleja) de un circuito eléctrico de corriente alterna es la suma (vectorial) de la potencia activa y la reactiva.

POTENCIA REACTIVA: esta potencia no tiene tampoco el carácter realmente de ser consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil. Se mide en voltamperios reactivos (VAR) y se designa con la letra Q.

PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN (PCC): es el punto de la red de distribución, el más próximo eléctricamente de un usuario, al que están o pueden ser conectados otros usuarios.

P.U: en la Ingeniería Eléctrica, en el campo de los Sistemas Eléctricos de Potencia, se expresan las cantidades eléctricas (Potencia, Voltaje, Amperaje, Impedancia) como valores en por unidad. El sistema por unidad de cualquier cantidad se define como la relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal.

RECIERRE: los recierres automáticos son la operación de cierre de un interruptor, luego de un retardo preestablecido que se realizará en forma automática después de la apertura del mismo ordenada por el sistema de protecciones asociado.

RECONECTADOR (RECLOSER): esto es un aparato que puede realizar múltiples aperturas y cierres en un sistema de potencia. Si se presenta una falla en la línea el aparato (internamente es un interruptor) abre el circuito y pasado un cierto tiempo vuelve a cerrar. Si la falla desaparece vuelve a cerrar y el servicio sigue normalmente. Pero, si la falla persiste se repite la maniobra.

SOBRETENSIÓN: las sobretensiones son perturbaciones electromagnéticas de muy corta duración y alta frecuencia, que se propagan como ondas viajeras por la línea de conducción.

TAP: son derivaciones de alguno de los bobinados del transformador, a veces para cambiar el voltaje de entrada, o para escoger distintos voltajes de salida en el secundario, o para variar la impedancia de carga en caso de un transformador de audio, ya sea de acoplamiento, micrófono o de salida.

UPS: sistema ininterrumpible de potencia. Es un sistema diseñado para proporcionar energía eléctrica de manera automática, sin retardos ni transitorios, durante un período cuando el suministro normal de energía eléctrica no puede funcionar de manera aceptable.

INTRODUCCIÓN

Los picos de tensión y las interrupciones son problemas relacionados de la calidad de la energía. Ambos ocurren generalmente por el resultado de fallas en el funcionamiento del sistema y de la conmutación de energía para aislar las secciones críticas, siendo caracterizados por variaciones del voltaje RMS fuera del rango de operación normal de la tensión.

Los huecos de tensión son una reducción de corta duración (típicamente 0,5 a 30 ciclos) en el voltaje RMS causado por las fallas en el sistema de potencia y, por la conexión de grandes cargas, tales como motores. Las interrupciones momentáneas (típicamente no más de 2 a 5 segundos) causan una pérdida completa de voltaje y son un resultado común de las acciones tomadas por las empresas de energía a las fallas transitorias en los sistemas. Las interrupciones sostenidas de más de un (1) minuto son generalmente debido a daños ó fallas permanentes.

Las quejas sobre la calidad de la energía debido a los huecos de tensión y a las interrupciones son muy altas; y hay un número de razones para esto, la más importante es que los clientes, en todos los sectores, (residencial, comercial, e industrial) tienen cargas muy sensibles. La gran cantidad de equipos de cómputo y de otros tipos de controles electrónicos está en el centro del problema. Los controles de computadora tienden a perder su memoria por éstos picos y fluctuaciones, y los procesos que se están controlando, toman mucho más tiempo para reiniciar. Las industrias están confiando más en el equipo automatizado para alcanzar productividad máxima para seguir siendo competitivas. Así, una interrupción tiene un impacto económico considerable.

El término calidad de la potencia se emplea, en general, para calificar las dos principales variables de un sistema eléctrico: la tensión y la frecuencia. Establecida la continuidad de suministro, para la gestión de la calidad de la potencia se establecen calificadores de la forma de la onda de tensión para juzgar las desviaciones de forma y frecuencia y evaluar el impacto sobre la carga de los usuarios o sobre la operación del sistema de potencia. De allí, se identifican acciones de mejoramiento en el sistema de potencia o en la carga frente a fenómenos controlables, y acciones de mitigación frente a fenómenos no controlables. La calidad de la potencia está influenciada por perturbaciones de diversa naturaleza, fenómenos electromagnéticos, electromecánicos, falla de

equipos, características no lineales de la carga, y conexión y desconexión de fuentes de potencia activa y reactiva, entre otros.

Este documento plantea la realización de un estudio bibliográfico del impacto económico que tienen los huecos de tensión en el sector industrial específicamente en los transformadores y en los motores.

1. JUSTIFICACIÓN

La continuidad, confiabilidad y calidad del servicio eléctrico ha llegado a ser extremadamente crucial para muchos usuarios de energía eléctrica debido al uso cada vez mayor de controles sofisticados y equipamiento industrial. Los sistemas eléctricos están sujetos a una amplia variedad de problemas de calidad de energía, que pueden interrumpir procesos de producción, afectar equipos sensibles y causar tiempos muertos, desechos y pérdidas en la capacidad productiva. Las fluctuaciones momentáneas de tensión impactan desastrosamente en la producción.

Los huecos de tensión producen efectos en los equipos que se ven sometidos a ellos, en función de las características propias de los huecos de tensión y de la naturaleza del equipo afectado y del tipo de conexión a la red. Además suceden pérdidas de información en sistemas informáticos, alteración de funcionamiento de controladores electrónicos de procesos en tiempo real o interrupción de procesos, interrupción de sistemas de iluminación y efectos económicos².

Entre los tipos de equipos que se ven afectados por los huecos de tensión se encuentran: motores de inducción, transformadores, motores síncronos, convertidores electrónicos, sistemas de control, ordenadores, etc. Este proyecto de grado se centra en el estudio de los efectos de los huecos de tensión en los motores de inducción trifásicos y en los transformadores trifásicos, desde el punto de vista del costo económico de los efectos producidos.

² DUNGAN, Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne. Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p. 147

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Un hueco de tensión es una bajada súbita del valor RMS de la tensión, en un punto de una red de energía eléctrica, hasta un valor comprendido, por convenio, entre el 90% y el 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), o entre el 90% y el 10% (IEEE 1159) de una tensión de referencia (V_{ref}), seguida de un restablecimiento de la tensión de red, después de un corto lapso de tiempo comprendido entre un semiperíodo de la fundamental de la red y un minuto.

Generalmente, la tensión de referencia es la tensión nominal para las redes BT y la tensión declarada para las redes MT y AT. También puede utilizarse una tensión de referencia desplazada, igual a la tensión antes de la perturbación, en las redes MT y AT equipadas con un sistema de ajuste (ajuste en carga) de la tensión en función de la carga. Esto permite estudiar, con la ayuda de medidas simultáneas en cada red, la transferencia del hueco entre los diferentes niveles de tensión.

Los huecos de tensión se caracterizan con base en varios factores de medición:

- **Magnitud del hueco de tensión.** Es la tensión eficaz existente durante el hueco de tensión en por unidad (P.U.) con respecto a la tensión pre-hueco (V_h). (En caso de huecos no rectangulares, esta magnitud es función del tiempo).
- **Caída de tensión.** Es la diferencia entre la tensión eficaz pre-hueco y la tensión eficaz durante el hueco (ΔV). En caso de huecos no rectangulares, también es función del tiempo.
- **Duración del hueco de tensión.** Tiempo durante el cual la tensión eficaz es inferior al 0,9 p.u. y superior 0,1 p.u. de la tensión nominal (Δt).

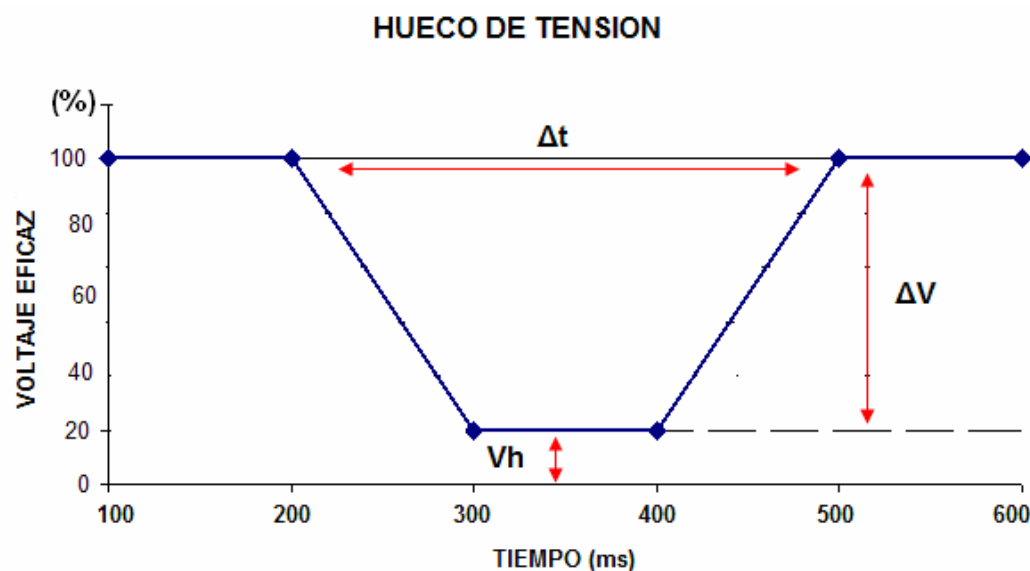
El gráfico 1 muestra la caracterización de un hueco de tensión, donde:

V_h : Magnitud de la tensión del hueco en PU (%)

ΔV : Caída de tensión del hueco en PU (%).

Δt : Duración del hueco en milisegundos o ciclos.

Gráfica 1. Caracterización de un hueco de tensión



La medida de Calidad de la Energía Eléctrica (CEE) consiste habitualmente en determinar las perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia que se encuentran en la siguiente gama:

- Huecos de tensión y cortes.
- Armónicos e interarmónicos.
- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones transitorias.
- Fluctuaciones de tensión.
- Desequilibrios de tensión.
- Variaciones de frecuencia de alimentación.

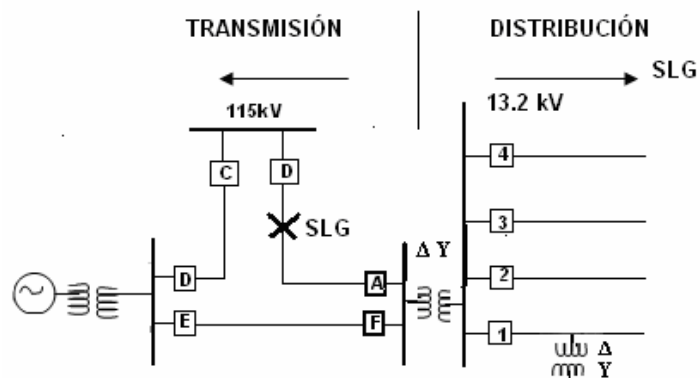
- Componentes CC en las redes.

En general no es necesario medir todo el conjunto de estas perturbaciones. Pueden agruparse en cuatro categorías según que afecten a la amplitud, la forma de onda, la frecuencia y la simetría de la tensión. Frecuentemente, una misma perturbación afecta o modifica a la vez a varias de estas características. Pueden también clasificarse según su carácter aleatorio (rayo, maniobra, cortocircuito...), en permanentes o semipermanentes.

Los huecos de tensión y los cortes breves están ocasionados principalmente por fenómenos conducidos con corrientes elevadas que provocan, a través de las impedancias de los elementos de la red, una caída de tensión de amplitud tanto menor cuanto más alejado de la fuente de perturbación está el punto de observación.

Son causados generalmente por las fallas (cortocircuitos) en el sistema que alimenta a los usuarios. Con la ayuda de la gráfica 2.2 se muestran algunas de las causas. Si se presenta una falla en uno de los alimentadores de distribución a 13,2 kv, tanto los usuarios de ese alimentador, como aquellos que están conectados a los otros alimentadores, de la misma subestación, experimentarán un hueco de tensión durante el evento, seguida por una interrupción cuando el interruptor se abre para despejar la falla. Si la falla es temporal, el interruptor regresará a su posición normalmente cerrado. Si la falla que se presentó es de tipo permanente, el interruptor, en asocio con los recierres, requerirá generalmente hasta 4 operaciones de apertura – cierre para desconectar la falla del sistema, con la consecuente pérdida de la carga.

Gráfica 2. Causas de los Picos de Voltaje



Fuente: DUNGAN, Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne. Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p. 44.

Un hecho mucho más común sería una falla en alguna parte en el sistema de la transmisión (véase la localización de la falla mostrada en la gráfica 2).

Si se presenta una falla en el sistema de 115 kv, por ejemplo en la línea protegida por los interruptores A y D, todos los clientes del sistema eléctrico experimentarán huecos de tensión cuya magnitud y duración dependerán de la cercanía a la falla causante del hueco de tensión. Obsérvese que para despejar la falla mostrada en el sistema de la transmisión, los interruptores A y D deben operar.

En este caso hay dos líneas que proveen la subestación de la distribución y solamente una tiene falla. Por lo tanto, los usuarios alimentados desde la subestación deben esperar ver solamente un hueco y no una interrupción.

La importancia relativa de fallas en el sistema de la transmisión y el sistema de la distribución dependerá de las características específicas de los sistemas (subterráneos contra la distribución aérea, rayos, etc.) y de la sensibilidad del equipo a los huecos de tensión.

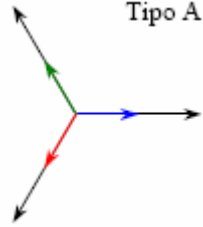
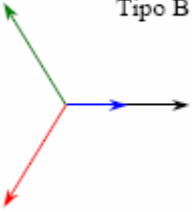
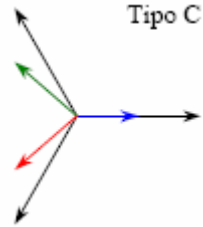
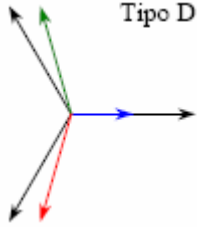
- **Influencia de las conexiones de los transformadores sobre los huecos de tensión.** La conexión de los transformadores en las redes de distribución y transmisión de energía eléctrica afectan la propagación de los huecos de tensión.

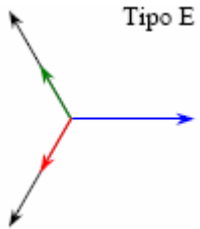
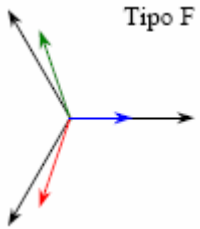
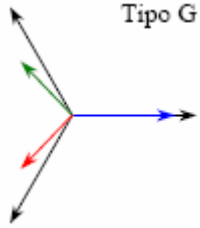
Para evaluar el impacto de las conexiones de los transformadores en la propagación de los hundimientos, es necesario saber que tipos de hundimientos existen y luego observar como estos varían al pasar a través de un transformador con una conexión determinada.

Una de las clasificaciones más comunes de los huecos de tensión establece siete diferentes tipos³. En la tabla 1 se puede observar esta clasificación.

³ BOLLEN, M.; STYVAKTAKIS, E. Characterization of three. phase unbalanced dips Power. Atlanta: Engineering Society Summer Meeting, 2000. p. 254.

Tabla 1. Tipos de huecos de tensión y sus respectivas características

TIPO DE HUECO DE TENSIÓN	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
Tipo A	Es producido por una falla trifásica y causa reducción de la tensión en las tres fases. La tensión residual de las fases depende de la distancia entre la ubicación de la falla y de la ubicación donde se este observando el hueco de tensión. Este tipo de evento se observa sobre cargas con conexión delta o estrella.	 <p>Tipo A</p>
Tipo B	Es producido por una falla monofásica y causa reducción de la tensión en una fase con respecto al neutro. Este evento se observa en cargas conectadas en estrella.	 <p>Tipo B</p>
Tipo C.	Es producido por una falla fase – fase y causa reducción de la tensión en dos fases, conjuntamente con cambios en el ángulo de fase. Este evento se puede observar en cargas conectadas en estrella si la falla fue bifásica.	 <p>Tipo C</p>
Tipo D.	Debido a la ocurrencia de una falla bifásica en el sistema se presenta un hueco de tensión en donde la tensión de cada una de las tres fases se reduce a valores distintos. Además de la reducción de tensión, los vectores de las fases afectadas cambian su posición haciendo que la diferencia angular difiera de los 120° entre fases. Este evento se observa en cargas conectadas en Delta.	 <p>Tipo D</p>

Tipo E	Se trata de un hueco de tensión en donde la tensión de dos fases se reduce hasta cierto valor debido a la ocurrencia de una falla bifásica a tierra en el sistema. Este evento se puede observar en cargas conectadas en estrella y sus características están ligadas a las condiciones de puesta a tierra de la carga.	 <p>Tipo E</p>
Tipo F	Es un hueco de tensión en donde la tensión de cada una de las tres fases se reduce a valores distintos debido a la ocurrencia de una falla bifásica en el sistema. Los vectores de las fases afectadas cambian su posición haciendo que la diferencia angular difiera de los 120° entre fases. Este tipo de hundimiento se observa en el devanado de baja tensión, cuando ocurre un hundimiento tipo E en el devanado de alta si el transformador tiene conexiones Dy, Yd o Yz. La diferencia entre el evento tipo F y el evento tipo D radica en el cálculo de las tensiones de cada fase.	 <p>Tipo F</p>
Tipo G	Es un hueco de tensión en donde la tensión de las tres fases se reduce hasta cierto valor debido a la ocurrencia de una falla bifásica a tierra en el sistema. Además de la reducción de tensión, los vectores de las fases afectadas cambian su posición haciendo que la diferencia angular difiera de los 120° entre fases. Este tipo de hundimiento se observa en el devanado de baja tensión, cuando ocurre un hundimiento tipo E en el devanado de alta si el transformador tiene conexiones Yy, Dd o Dz.	 <p>Tipo G</p>

De acuerdo a lo anterior, cada tipo de falla que ocurre en el sistema y dependiendo de la conexión de la carga, puede ocasionar diferentes tipos de hundimientos tal como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de hundimiento según la falla y la conexión de la carga

Tipo de falla	Carga conectada en Estrella	Carga conectada en Delta
Falla trifásica	Tipo A	Tipo A
Bifásica a tierra	Tipo E	Tipo F
Bifásica	Tipo C	Tipo D
Monofásica	Tipo B	Tipo C

Cada hundimiento que se propaga por la red, cambia de un tipo a otro cuando pasa del devanado primario de un transformador al secundario de este.

Adicionalmente a lo explicado en los párrafos anteriores, a continuación se hace un resumen de las posibles causas de los huecos de tensión dependiendo de la fuente de su origen, ya sea desde los sistemas de las empresas electrificadoras o desde las plantas industriales.

2.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN

- Operación de reconectadores e interruptores. Si por alguna razón algún reconector o interruptor opera, el circuito de distribución asociado será desconectado. Independiente de la duración de esa interrupción, los demás circuitos de la misma subestación verán esta desconexión como un hueco de tensión, afectando a los usuarios conectados a ellos.
- Fallas en los equipos. Al presentarse una falla en el equipamiento de la red eléctrica, ya sea por defectos en su construcción, en sus materiales o por su operación incorrecta, esto conllevará al disparo de interruptores y reconectadores, presentándose huecos de tensión en otros circuitos.
- Condiciones atmosféricas adversas. Las lluvias, las descargas atmosféricas, los fuertes vientos, las nevadas, .etc. afectan en gran manera los sistemas de transmisión y distribución siendo la causa de numerosos huecos de tensión.

- **Polución.** Los ambientes salinos y el polvo contaminan los aisladores que soportan las líneas eléctricas, teniendo como resultado el deterioro del aislamiento y la consecuente falla de los mismos, ocasionando cortocircuitos.
- **Animales.** Especialmente aves, en nuestro medio, son las causas de cortocircuitos en las redes de media tensión.
- **Problemas con vehículos.** La colisión de vehículos contra las redes eléctricas de las empresas distribuidoras, afecta de una manera importante la prestación del servicio de electricidad.

En la tabla 3 se pueden ver algunas estadísticas de fallas en los sistemas de distribución de una empresa distribuidora de electricidad en Colombia.

Tabla 3. Estadísticas de fallas en el sistema de distribución

Fecha	Tiempo inicio	Tiempo fin	Código del evento	Clientes por fuera	Carga (Kva)	Tipo Interrupción
3/17	12:12:20	12:20:30	107	200	800	Sostenida
4/15	18:23:56	18:24:26	256	400	1600	Momentánea
5/5	00:23:10	01:34:29	435	600	1800	Sostenida
6/12	23:17:00	23:47:14	567	25	75	Sostenida
7/6	09:30:10	09:31:10	567	2000	4000	Momentánea
8/20	15:45:39	20:12:50	832	90	500	Sostenida
8/31	08:20:00	10:20:00	1003	700	2100	Sostenida
9/3	17:10:00	17:20:00	1100	1500	3000	Sostenida
10/27	10:15:00	10:55:00	1356	100	200	Sostenida

- **Plantas industriales.** El arranque de grandes motores en plantas industriales son la principal causa de numerosos huecos de tensión.

El punto de inicio del hueco tensión es el ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se inicia el hueco (θ_i), el cual corresponde al ángulo de fase en el instante que ocurre una falla. El punto de recuperación del hueco es el ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se recupera la

tensión (θ_r) y que corresponde al ángulo de fase en el instante que se elimina la falla. El hueco no rectangular, es un hueco de tensión en el cual la magnitud del hueco no es constante con el tiempo. El salto o desplazamiento del ángulo de fase, es la diferencia entre los ángulos de fase de las tensiones fundamentales existentes antes y durante el hueco de tensión.

La severidad de los huecos de tensión puede clasificarse de diferentes maneras. En la tabla 4 se muestra una caracterización de la severidad establecida por Mora F Juan José en el desarrollo del proyecto SECSE en la UNIVERSITAT DE GIRONA (20029).

Tabla 4. Caracterización de acuerdo al criterio de severidad del Hueco de tensión.

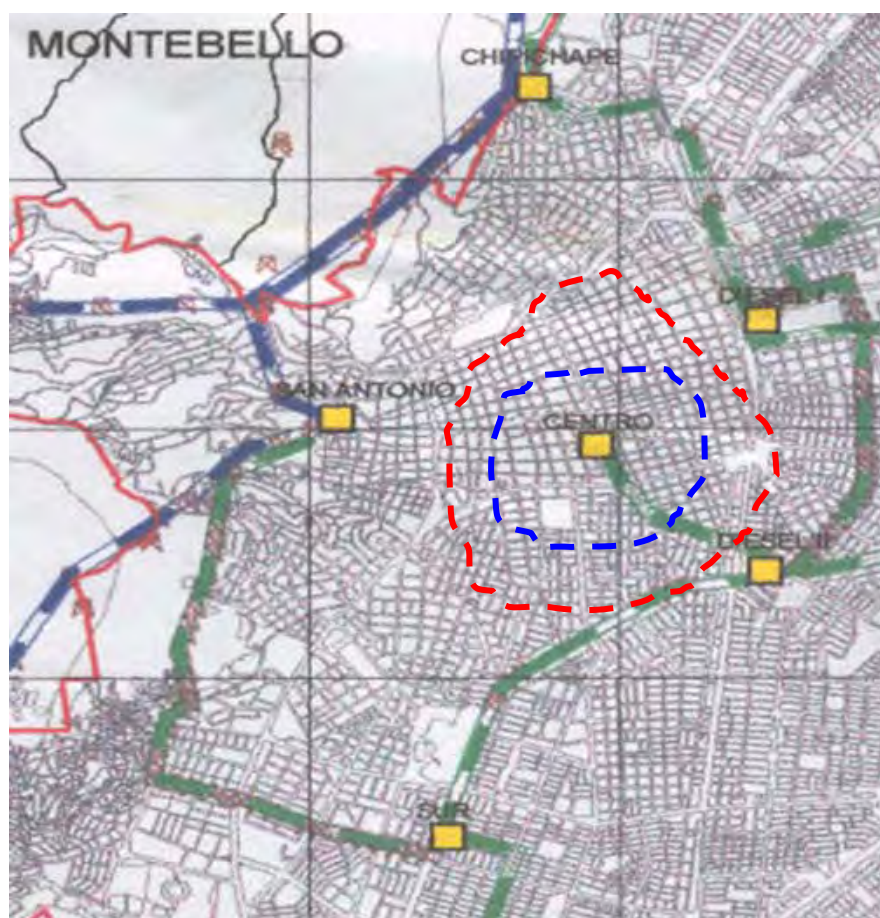
Parámetro	Valores Severidad		
Descriptor	Alta	Media	Baja
Caída de tensión en p.u. de la nominal	$>0,5$	$0,2 < \Delta V \leq 0,5$	$\leq 0,2$
Duración del hueco (s)	$>1\text{seg}$	$30 \text{ Ciclos} < t \leq 1 \text{ seg.}$	$\leq 30 \text{ Ciclos}$
Energía perdida en porcentaje de nominal en la duración del hueco	$>0,4$	$0,15 < \Delta V \leq 0,4$	$\leq 0,15$
Salto de fase sobre 360 grados	$1/4 < \theta \leq 3/4$	$1/8 < \theta \leq 1/4$ $3/4 < \theta \leq 7/8$	$0 < \theta \leq 1/8$ $7/8 < \theta \leq 1$

En la caracterización siempre se observa que en el primer semiperíodo ocurre el máximo de intensidad durante el hueco, como luego de la “normalización” de la tensión. El análisis de calidad de servicio de una red mediante la evaluación de índices requiere la existencia de un conjunto de reglas que permitan homogeneizar la caracterización de un hueco de tensión, independientemente de quien realice las medidas y el análisis. La definición de los valores característicos de un hueco de tensión es relativamente sencilla en el caso monofásico, complicándose algo más para el caso trifásico.

- **Área de la vulnerabilidad.** El concepto de área de la vulnerabilidad se ha desarrollado para ayudar a evaluar la probabilidad de falla de los equipos sensibles a las características críticas de los huecos de tensión. Se define como el área geográfica en la cual se puede ubicar la magnitud mínima del voltaje que

un equipo puede soportar sin tener mal funcionamiento. El gráfico 3 muestra un ejemplo (este ejemplo es hipotético) de cómo podría definirse el área de vulnerabilidad, en este caso para un sector de la ciudad de Cali. Se muestran dos áreas enmarcadas alrededor de la subestación Centro del sistema eléctrico de Emcali. El área enmarcada por la línea a trazos azul podría corresponder a un sector en el cual podrían verse afectados los contactores; mientras que la línea roja definiría el área en la cual se podrían afectar los controladores de velocidad de los motores. El número real de los huecos de tensión que una empresa de electricidad puede esperar, es determinado combinando el área de la vulnerabilidad con el funcionamiento previsto de la falla para esta porción del sistema de energía. La falla se determina generalmente con base en los datos históricos.

Gráfica 3. Ilustración de un área de la vulnerabilidad



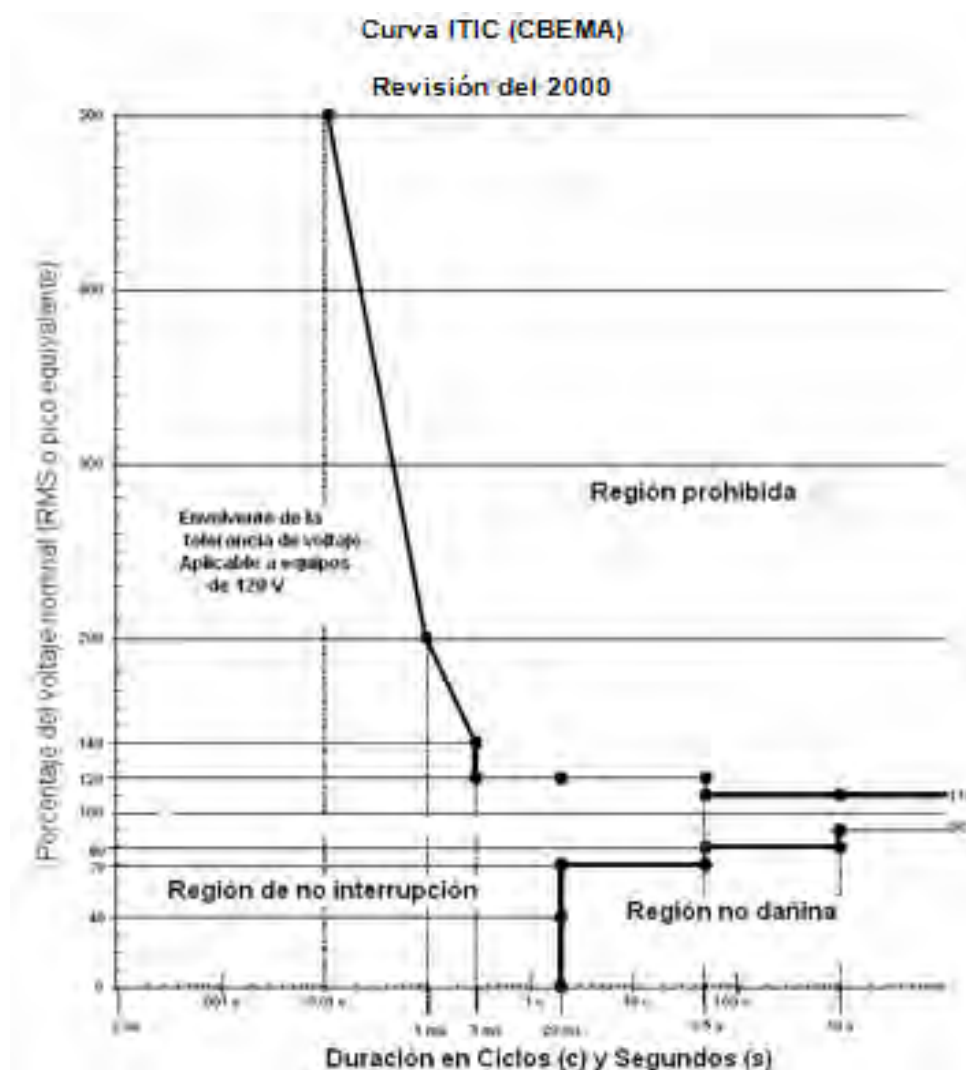
Generalmente, la sensibilidad del equipo a los huecos de tensión se puede dividir en tres categorías:

- Equipo sensible solamente a la magnitud de un hueco de tensión. Este grupo incluye los dispositivos tales como relés de sobrevoltaje, controles de proceso, controles de la impulsión del motor y muchos tipos de máquinas automatizadas. Los dispositivos en este grupo son sensibles a la magnitud mínima de la tensión experimentada durante un hueco. La duración del disturbio es generalmente de importancia secundaria para estos dispositivos.
- Este grupo incluye todo el equipo que utilice fuentes de alimentación electrónicas. Aquí la característica importante para este tipo de equipo es la duración que la tensión RMS esté debajo de un umbral especificado.
- Equipo sensible a otras características con excepción de la magnitud y de la duración. Algunos dispositivos son afectados por otras características del hueco tales como el desequilibrio de la fase durante el acontecimiento del hueco, punto en el cual se inicia el hueco, o cualquier oscilación transitoria que ocurre durante el disturbio. Estas características son más sutiles que magnitud y la duración, y sus impactos son mucho más difíciles de generalizar.

3. IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN SOBRE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La curva ITIC generada desde el consejo tecnológico de la industria de la tecnología informática (Information Technology Industry Council, ITIC), también conocida como la curva CBEMA (Computer and Business Equipment Manufacturers Association) mostrada en la gráfica 4 describe la tolerancia que puedan soportar los equipos, a los diferentes cambios de la tensión.

Gráfica 4. Curva ITIC



Por ejemplo, un equipo de computo debe tolerar una sobretensión de cinco veces el voltaje nominal para una duración de 100 μ s pero, solamente el 20% de sobretensión por 10 ms.

Cualquier variación de la tensión, especialmente las causadas por los huecos de tensión, pueden llevar a que un equipo funcione inadecuadamente.

La red de distribución secundaria es una parte del sistema de distribución de energía eléctrica, de la cual se conectan directamente los clientes residenciales, comerciales y pequeñas industrias mediante un conductor o acometida.

La red secundaria esta conformada por los conductores que constituyen la red secundaria, la acometida, el contador y el transformador de distribución con sus respectivas protecciones.

Nuestro sistema tiene claramente definidos los niveles de tensión en las redes de distribución secundaria. Los dos tipos de sistemas de distribución más comunes son:

- Trifásicos de cuatro hilos: 208/120 voltios.
- Monofásicos de tres hilos: 240/120 voltios.

Para propósitos de este estudio se dividen los equipos de consumo eléctrico en varios grupos:

• **Equipos industriales.** Los grandes motores existentes en este tipo de industrias cuando se alimentan directamente de la red suelen ser afectados por huecos de tensión de una profundidad menor del 30% y duración inferior al segundo. Sin embargo, debido al uso cada vez más generalizado de variadores de velocidad (equipos electrónicos que controlan el arranque, velocidad y par del motor) el conjunto variador-motor es sensible a huecos de profundidad superior al 20% y duración superior al segundo, pues suponen el disparo del variador y la parada de producción.

• **Equipos informáticos.** En general, los equipos informáticos son sensibles a huecos de profundidades mayores al 10%. Los microcomputadores son

normalmente sensibles a eventos de una duración de 4 ó 5 ciclos y un 100% de amplitud. Los huecos de tensión y las interrupciones breves en estos equipos pueden ocasionar pérdidas económicas muy importantes, ya sea por pérdida de datos (Ej. centro de control de un banco) o por parada de la producción (Ej. ordenador de control de una planta de producción), ya que un hueco en un procesador de control puede originar que interprete erróneamente o pierda señales.

• **Equipos de alumbrado y calefacción.** El funcionamiento de los equipos de alumbrado y calefacción no se ve afectado por los huecos. Únicamente las lámparas de descarga, en el caso de huecos de una profundidad superior al 50%, pueden llegar a apagarse. Una vez recuperada la tensión el encendido puede llevar unos minutos.

Entre las diferentes anomalías eléctricas que se pueden presentar en una red de distribución secundaria y que inciden en la magnitud de la tensión, se encuentran: sobretensión, variación del voltaje, alto voltaje y neutro flotante entre otras, siendo estas las mas frecuentes.

Es prácticamente imposible eliminar las fallas en las redes de transmisión y distribución, por lo tanto los huecos de tensión seguirán existiendo. Un adecuado trabajo de mantenimiento preventivo puede disminuir mucho la cantidad de fallas y la búsqueda permanente de una mejor confiabilidad en los sistemas ayudará a disminuir los efectos nocivos de los huecos de tensión.

Huecos de tensión que involucren una o varias fases pueden causar daños en la producción ya que muchos dispositivos y sensores electrónicos, alimentados a 120 V, son generalmente vulnerables a ellos.

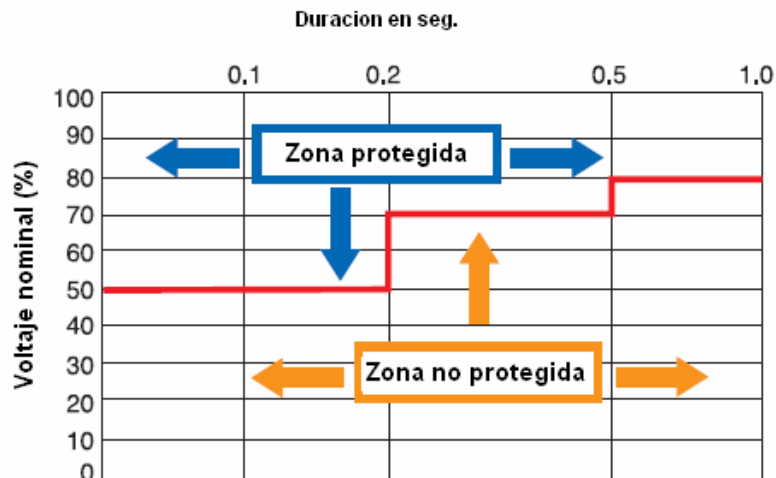
Equipos modernos de control requieren de una regulación de tensión mucho más precisa, comparada con la regulación tradicional que se aplica por ejemplo a los motores. Procesos con control electrónico, sensores, PLC's y controles de velocidad variables, así como los relés de protección convencionales, tienen un determinado grado de susceptibilidad a los huecos de tensión.

La norma SEMI F47 es una norma en la industria de semiconductores para la inmunidad de los huecos de tensión. Define el grado de inmunidad a los huecos de tensión (una y dos fases) para semiconductores utilizados en equipos de

procesamiento. Para cumplir con esta norma otros componentes (relés y contactores) también deben cumplirla.

Las especificaciones de la norma SEMI F47 establece que equipos semiconductores utilizados en procesamiento, metrología y para prueba automática de equipos, debe ser diseñado y construido de tal forma que cumpla con la curva mostrada en el gráfico 5.

Gráfica 5. Zona de protección para semiconductores (SEMI F47)



Los huecos de tensión presentan inconvenientes en los motores de inducción tales como aceleración, pérdida de velocidad y picos de corriente.

Los huecos de tensión impactan negativamente los procesos de producción debido a la vulnerabilidad de los dispositivos de control y de los sensores a este fenómeno.

El equipo electrónico moderno requiere de una regulación más precisa que la utilizada generalmente para equipos de potencia tales como motores.

En la tabla 5 se muestran algunos datos tomados de la norma de la IEEE std. 1346 de valores medios de la tolerancia a los cambios de tensión de algunos equipos.

Tabla 5. Tolerancia a la tensión de varios equipos

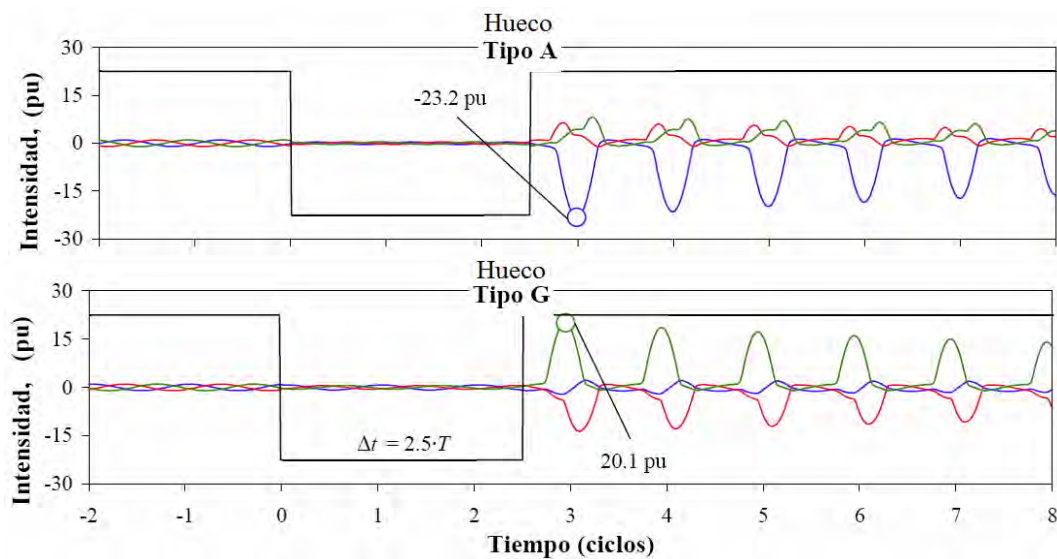
Equipo	Tolerancia promedio a la tensión
PLC	260 ms, 60%
Drive para motor CA de 5 HP	50 ms, 75%
Relé de CA	20 ms, 65%
Arrancador de motor	50 ms, 50%
Computador personal	50 ms, 60%

Cualquier equipo electrónico moderno debe usar una etapa de conversión CA/CC para alimentar correctamente los diferentes elementos y circuitos del dispositivo. La mayoría de las etapas de conversión, etapa de corriente alterna a corriente continua son afectadas por los huecos de tensión, a menos que se tengan consideraciones especiales para evitarlo.

4. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN LOS TRANSFORMADORES

El efecto más visible observado en los transformadores, debido a la presencia de huecos de tensión, es el del incremento de la corriente. Estos incrementos de corriente, los cuales pueden llevar a saturar el transformador, van a depender del tipo y de las características de los huecos de tensión, así como de los parámetros del transformador y las características de la carga. En la gráfica 6 se puede observar esta situación para dos tipos de huecos de tensión diferentes.

Gráfica 6. Intensidad en el primario de un transformador de tres columnas ante huecos de tensión tipos A y G.



Fuente: GUASCH PESQUER, Luis; CÓRCOLEZ LÓPEZ, Felipe. Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y transformadores Trifásicos. Barcelona: Paraninfo, 2006. p. 87.

En ambos tipos de huecos la corriente se incrementa en las diferentes fases dependiendo del tipo de hueco utilizado para el análisis. En ambos casos el incremento máximo de la corriente alcanza un valor superior a 20 veces en p.u. Estudios han mostrado que a mayor profundidad del hueco de tensión, mayor será la intensidad de la corriente.

La comparación de los resultados obtenidos, cuando se analizan transformadores de tres columnas y de cinco columnas, muestran que los picos de corriente en transformadores de cinco columnas son mas simétricos que en los de tres columnas⁴.

Los incrementos de la corriente conllevan otros efectos implícitos, como son el aumento de las perdidas tanto en el hierro como en el cobre y calentamientos suplementarios.

Los transformadores son separadores eficaces, particularmente efectivos para mitigar los huecos de tensión. Los transformadores se pueden clasificar en tres (3) grupos en función de su influencia en la transmisión de huecos de tensión.

- El grupo I YNyn en el cual no se producen cambios entre primario y secundario (componente primario y secundario, igual componente homopolar secundario) con índices horarios 0, 4, 8, 6, 10 y 2.
- El grupo II YNy Yyn Yy, Dd y Dz, Dzn cuyas características son la eliminación de componente homopolar presente en el primario. Con índices horarios 0, 4, 8, 6, 10 y 2.
- El grupo III con conexiones Dyn Dy, YNd Yd, YNz Yzn Yz con la característica de permutación de tensiones de línea y de fase y con índices horarios 1, 5, 9, 7, 11 3.

Para los tres grupos los índices horarios no influyen debido a que sólo suponen un giro de 120° entre las tensiones de primario y secundario (que equivale a renombrar las fases del secundario), o un giro de 180° (que equivale a invertir el sentido de referencia en las bobinas del secundario). Por ejemplo, los índices 0, 4, 8 son idénticos entre sí, pero girando 120° las fases a, b, c; mientras que los índices 6, 10, 2 son idénticos a los anteriores pero invirtiendo el sentido de referencia de las tensiones del secundario (giro de 180°).

La propagación y las características del hundimiento dependen directamente del tipo de conexión del transformador. En la tabla 6 se observa como un hundimiento

⁴ DOLATIAN, M. R.; A. JALILIAN, A. Voltage Sag Effect on Three Phase Five Leg Transformers. En: Computer and Systems Engineering. Vol. 18, No. 2. (Ene - May 2000). p. 157.

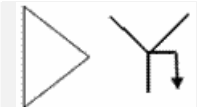
de tensión en el devanado primario se transforma en otro en el devanado secundario, según el grupo de conexión.

Tabla 6. Transformación del tipo de hundimiento en el devanado secundario del transformador

Conexión del transformador	Hundimiento en el lado Primario						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy,Dd,Dz	A	D	C	D	G	F	G
Yd,Dy,Yz	A	C	D	C	F	G	F

La tabla 7 muestra un ejemplo de la forma como se pueden reflejar los huecos de tensión, generados por fallas línea - tierra en el lado de alta tensión de transformadores con conexiones Δ - Y aterrizada, de uso común en nuestro medio.

Tabla 7. Ejemplo de interrupción según conexión del transformador

TIPO DE CONEXIÓN	TENSIÓN EN LAS FASES			TENSIONES FASE - NEUTRO		
	0.88	0.88	0.33	0.58	1.00	0.58

Fuente: DUNGAN, C Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p 119.

Huecos de tensión con valores de tensión en p.u. de 0.88, 0.88 y 0.33 en la Δ , se reflejarán en el lado de la Y con tensiones fase-neutro de 0.58, 1.00 y 0.58, siendo mucho más crítica esta situación en la carga.

5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN LOS MOTORES

Los huecos de tensión son descritos normalmente por la magnitud, variación y la duración del hueco de tensión. Además de estas cantidades, también son caracterizados por el desequilibrio (asimetría), formas de onda no sinusoidales, y el cambio del ángulo de la fase (salto de la fase). Estos factores son importantes para determinar el comportamiento de los motores.

Uno de los problemas más grandes de la calidad de la energía son los efectos nocivos a los cuales se enfrentan los motores ante la presencia de huecos de tensión. Para estudiar este fenómeno en detalle, es necesario disponer de un generador de huecos de tensión para generar curvas de inmunidad para los motores de inducción así como para los motores sincrónicos.

Los huecos de tensión tienen gran influencia sobre el comportamiento de los motores, más aún si se considera que más del 50% de la electricidad consumida en los países en vía de desarrollo es consumida por los motores.

5.1 MOTORES DE INDUCCIÓN

Los efectos más notorios causados por los huecos de tensión, sobre los motores, son la pérdida de velocidad del motor, picos de corriente, picos en el torque y aumento de las pérdidas de energía por calentamiento (debido al aumento de la corriente) de los motores de inducción. Por lo tanto, las variables que deben ser estudiadas son la intensidad instantánea $I(t)$, el par instantáneo $\Gamma(t)$, y la velocidad instantánea $\omega(t)$. Muchas veces el efecto será de tal magnitud que se llegue hasta la desconexión de la máquina, causando considerables pérdidas económicas.

Este tema ha sido estudiado en diferentes partes pero, solamente se va a hacer mención de los siguientes:

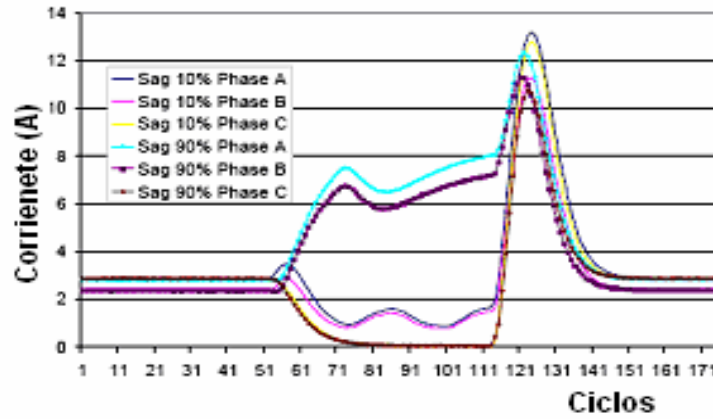
- Bong-Seok Kang, Jae-Chul Kim, Jong-Fil Moon, Sang-Yun. “A study of the Impact of Voltage Sags and Temporary Interruptions on 3-Phase Induction Motors” Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University. Seoul, Korea. 1998.
- Milutin P. Petronijevic, Borislav I. Jeftecnic, Nebojsa M. Mitrovic and Vojkan Z. Kostic “Voltage Sag Drop in Speed Minimization in Modern Adjustable Speed Drives”. Faculty of Electronic Engineering of Kralja Aleksandra. Serbia & Montenegro. 2005.
- H.G. Sarmiento, E. Estrada, “A Voltage Sag Study in an Industry with Adjustable Speed Drives”, IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1996, p. 16-19.
- Pérez John J., Cortés Camilo A. y Gómez Álvaro. “A study of voltage sags in electric motors” Grupo de investigación CALPOSALLE. Universidad de La Salle. Bogotá. Colombia. 1999.

5.1.1 Picos de intensidad. Los cambios súbitos de tensión producidos por los huecos de tensión producen cambios en las máquinas que se pueden considerar, la mayoría de las veces como transitorios. Dentro de estos cambios esta la disminución del torque de la máquina que a su vez, llevan a que se presenten picos en la corriente los cuales a su vez pueden deteriorar el aislamiento de la máquina.

En varias pruebas realizadas, con diferentes tipos de huecos de tensión, es muy posible observar que el punto de onda inicial del hueco de tensión se caracteriza al tener influencia en los máximos picos de intensidad encontrados.

Uno de estos casos se muestra en la Gráfica 7, que representa la evolución temporal de la intensidad del motor cuando se ve sometido a los diferentes huecos de tensión. Para todos los casos estudiados se presentan picos de intensidad durante el hueco y tras la recuperación de la tensión.

Gráfica 7. Variación de la corriente en un motor de inducción en presencia de diferentes huecos de tensión.



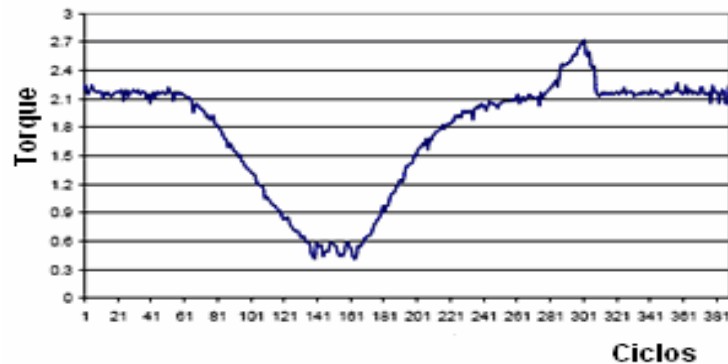
Fuente: PÉREZ, John J.; CORTÉS, Camilo A.; GÓMEZ, Álvaro. A study of voltage sags in electric motors. Bogotá: Universidad de La Salle, 1999. p. 220.

En la caracterización siempre se observa que en el primer semiperíodo ocurre el máximo pico de intensidad durante el hueco, como luego de la normalización de la tensión.

5.1.2 Picos de par. A diferencia de lo que sucede con los picos de intensidad, el máximo pico de par no siempre se encuentra en el primer semiperíodo tras la caída de tensión o tras la recuperación de la misma. Una característica observable es que el par oscila durante el hueco de tensión si éste es asimétrico. De otra forma se aprecia el par pulsante como consecuencia a la componente inversa de la tensión.

En la gráfica 8 se observa la variación del torque en presencia de un hueco de tensión tipo B.

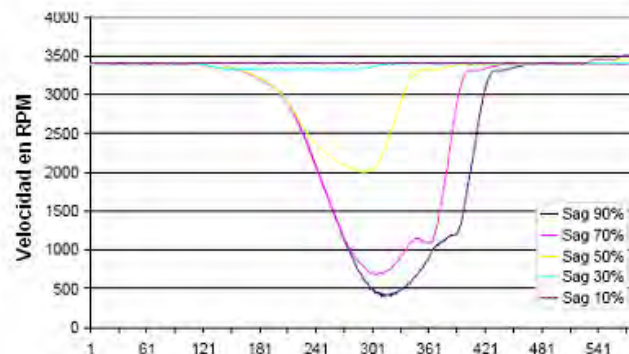
Gráfica 8. Variación del par de un motor de inducción en presencia de diferentes huecos de tensión.



Fuente: PÉREZ, John J.; CORTÉS, Camilo A.; GÓMEZ, Álvaro. A study of voltage sags in electric motors. Bogotá: Universidad de La Salle, 1999. p. 228.

5.1.3 Pérdida de velocidad mecánica. Al analizar, en estado estable, el comportamiento de un motor de inducción ante la presencia de un hueco de tensión (se disminuye súbitamente el valor RMS de la tensión), se puede observar que el torque del motor se reducirá proporcionalmente al cuadrado de la tensión existente en los terminales del motor. Si el motor posee una constante de inercia baja, la reducción del torque llevará a una desaceleración del motor. En la gráfica 9 se puede ver la variación de la velocidad en un motor de inducción ante la presencia de diferentes huecos de tensión tipo A.

Gráfica 9. Sensibilidad en la velocidad a huecos de tensión en un motor de inducción.

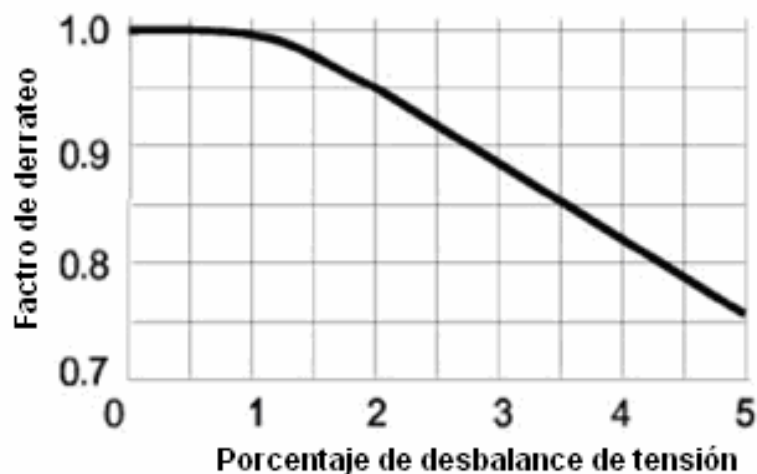


Fuente: PÉREZ, John J.; CORTÉS, Camilo A.; GÓMEZ, Álvaro. A study of voltage sags in electric motors. Bogotá: Universidad de La Salle, 1999. p. 231.

5.1.4 Calentamiento de los motores. La presencia de voltajes desbalanceados, tales como se presentan en los huecos de tensión, producen corrientes de secuencia negativa, los cuales a su vez generan calentamiento en los devanados del estator y del rotor, incremento en el consumo de energía y pérdida de eficiencia.

En el gráfico 10 se muestra, en forma aproximada como habría que derratear un motor ante la presencia de voltajes desbalanceados.

Gráfica 10. Derrateo en motores por desbalance de tensión



Resumiendo, los huecos de tensión presentan efectos dañinos sobre los motores de inducción. Se pueden presentar daños en el aislamiento debido a los picos de corriente; pérdida de vida útil ante la presencia de vibraciones y ruidos por el deterioro de la estructura de la máquina.

5.2 MOTORES SINCRÓNICOS

La máquina síncrona es una de las máquinas eléctricas más importantes, ya que se utiliza en los sistemas eléctricos de potencia como generador trifásico de tensión.

Los motores sincrónicos pueden soportar huecos de tensión más importantes (del orden del 50%) sin perder apenas velocidad, debido a su inercia, generalmente mayor, a las posibilidades de sobreexcitación y a la proporcionalidad de su par con la tensión. En caso de pérdida de sincronismo, el motor se para, y hay que volver a realizar todo el proceso de arranque, que es bastante complejo. Cuando se produce un hueco de tensión, disminuye el par motor, que es proporcional a la tensión, y puede llegar a caer fuera de sincronismo si su duración es elevada y la inercia del motor, pequeña.

La probabilidad de que esto ocurra no es alta, a no ser que el hueco supere el 50%, dada la gran masa inerte que estos motores generalmente poseen y sus posibilidades de sobreexcitación.

Debido a que estos motores suelen disponer de interruptor y relé de mínima tensión, podemos considerar:

- **Efectos sobre el control**

- Mediante contactores en alterna. En su variante más simple y extendida, al poner en marcha el motor, se actúa sobre un contactor, que se auto alimenta. Si la tensión se sitúa por debajo de un determinado nivel durante el funcionamiento normal del motor, el contactor cae y hay que reponerlo manualmente.

- Mediante interruptores y relés de mínima tensión. Para evitar que tenga lugar el arranque de la instalación entera cuando vuelve la tensión tras un cero, se suele dotar a ésta de relés de mínima tensión o de bobinas de tensión nula, que desconectan motores en función de la profundidad y duración del hueco.

6. MÉTODOS Y PROCESOS EXISTENTES PARA LA MITIGACIÓN DEL EFECTO DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Las acciones que se pueden tomar para reducir el número y los efectos de los huecos de tensión son numerosas, pero se podrían dividir en dos grupos:

- El primero dirigido a las empresas de energía eléctrica con el objetivo de reducir el número de huecos e interrupciones breves.

Con el objeto de reducir los efectos de los huecos, un método que se está aplicando, con buenos resultados, es instalar una bobina Petersen (reactancia regulable que ajusta su impedancia a la capacidad del sistema)⁵.

Los sistemas de puesta a tierra resonantes cuentan con una reactancia variable monofásica (bobina Petersen) que se conecta entre el neutro del transformador y tierra. En caso de falla a tierra monofásica, la corriente inductiva de la bobina cancela la corriente de falla capacitiva, de forma que la intensidad que circula por el punto de falla se reduce únicamente a la componente resistiva. Este tipo de conexión a tierra, permite adaptar la impedancia de la bobina a los cambios en la topología del sistema.

Las ventajas que presenta esta solución frente a las tradicionales puesta a tierra rígida o puesta a tierra a través de impedancia son:

- La compensación de la corriente de falla disminuye la magnitud de dicha corriente a un nivel tal que el valor de los incrementos del potencial de tierra fijados por las regulaciones de seguridad eléctrica se puedan obtener con costos inferiores de las puestas a tierra.

⁵ MAZÓN, A. J.; ZAMORA, I.; ANTEPARA, F.; MANTEGUI, J. A.; SAENZ J. R. Proyecto de diseño e instalación de una bobina Petersen como sistema de puesta a tierra para mejorar la calidad del suministro eléctrico. Dpto. de Ingeniería Eléctrica E. S. Bilbao: Iberdrola S.A., 2001. p. 152.

- Al reducirse la corriente de falla a tierra, el número de aperturas-cierres automáticos de alta velocidad provocados por las fallas a tierra disminuye un 70-90% (frente al sistema más habitual de puesta a tierra a través de impedancia), lo cual reduce el número de despejes transitorios.
- En condiciones de falla monofásica en el sistema se puede operar durante varias horas, aun cuando persista la falla. Se ha conseguido reducir el número de disparos por fallas transitorias en un 70%, lo que se traduce en una reducción del mismo porcentaje en el número de huecos e interrupciones breves.
- Otras soluciones aplicables buscan por reducir la posibilidad de que se origine un cortocircuito, tales como cambiar líneas y acometidas aéreas por subterráneas, (tienen menor tasa de fallo al no estar sometidas al ambiente externo, suciedad, descargas atmosféricas); invertir en equipos y en mantenimiento, con el objeto de reducir fallas por acumulación de suciedad, degradación, o fallas por contacto con superficie arbórea; o instalar protecciones para mejorar el apantallamiento de las líneas aéreas contra descargas atmosféricas.

Es importante entender el funcionamiento previsto del hueco de tensión en el sistema, para poder diseñar instalaciones con las especificaciones que aseguren la operación óptima de producción. A continuación se presenta un procedimiento general para trabajar con clientes industriales para asegurar la compatibilidad necesaria entre las características del sistema de fuente y la operación industrial:

- Determine el número y las características de los huecos de tensión que resultan de fallas del sistema de la transmisión.
- Determine el número y las características de los huecos de tensión que resultan de fallas del sistema de la distribución (para las instalaciones que se proveen desde un sistema de la distribución).
- Determine la sensibilidad del equipo a los huecos de tensión.
- Evalúe la economía de diversas soluciones que podrían mejorar el funcionamiento, en el sistema o dentro de las instalaciones del cliente.

Pero definitivamente la mejor forma de atenuar este fenómeno se encuentra tomando las debidas acciones preventivas y correctivas.

6.1. ACCIONES PREVENTIVAS

La implantación de medidas de prevención y corrección de los efectos de los huecos debe alcanzar las diferentes actividades del diseño, instalación y operación de las instalaciones.

6.1.1 Diseño e instalación.

- Alimentación eléctrica separando los circuitos de control y los circuitos de potencia.
- Alimentación a los circuitos de control con fuentes de muy alta calidad:
 - Corriente Continua con condensadores o baterías.
 - Corriente Alterna a través de sistemas de alimentación ininterrumpida.
 - Corriente Alterna a través de motor eléctrico-generador con volante de inercia.
- Especial atención a los circuitos de tierra, garantizando el valor adecuado de resistencia, tanto en Media como en Baja Tensión. Las líneas de circuitos de mando y control deberán apantallarse lo suficiente y conectarse debidamente al circuito de tierra.
- Los relés de protección deben ser adecuadamente seleccionados y tratados para no provocar actuaciones intempestivas.
- Adquisición de nuevo material inmune a los huecos de tensión existentes en la instalación.

Se debe cumplir la reglamentación vigente (Norma IEC 1000) en cuanto a la emisión de perturbaciones se refiere, garantizando que se encuentra por debajo

de los límites establecidos. El fabricante debe garantizar su nivel de inmunidad frente a las perturbaciones.

6.1.2 Operación de las instalaciones. El mantenimiento debe realizarse de forma adecuada, en especial en las instalaciones de MT. Un incorrecto mantenimiento puede afectar tanto a la instalación propia como a otras próximas.

- Adecuación en las instalaciones del cliente para evitar la producción y transmisión de huecos de tensión.

De las posibles recomendaciones orientadas a evitar la producción de estos efectos, se anuncian las siguientes:

- Instalación de arrancadores suaves o escalonados.
- Correcto diseño y ejecución cuidadosa de las instalaciones.
- Evitar las coincidencias de los picos de corriente en el uso de las diferentes cargas.
- Utilización de compensadores estáticos que mediante interruptores electrónicos y reactancias compensen las fuertes oscilaciones de corrientes en las cargas.
- Mantener un sistema confiable de protecciones internas de la instalación.
- Suprimir o reducir el consumo de corrientes armónicas.

6.2 ACCIONES CORRECTIVAS

Entre los medios de atenuación y corrección de los efectos de los huecos descritos se proponen los siguientes:

- Alimentar contactores y relés de los circuitos de mando, con corriente continua y condensador de almacenaje.
- Temporizar contactores y relés cuya velocidad no sea crítica en los procesos.
- Reajuste de tiempo y nivel de actuación de protecciones.

- Aumento de energía almacenada en las fuentes de alimentación a los circuitos electrónicos de control.
- Sustitución de tipos de lámparas de descarga sensibles a los huecos de tensión por otras que no lo sean.

6.3 SISTEMAS PARA LA MITIGACIÓN DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Los métodos mas utilizados para la mitigación de los efectos de los huecos de tensión son los siguientes:

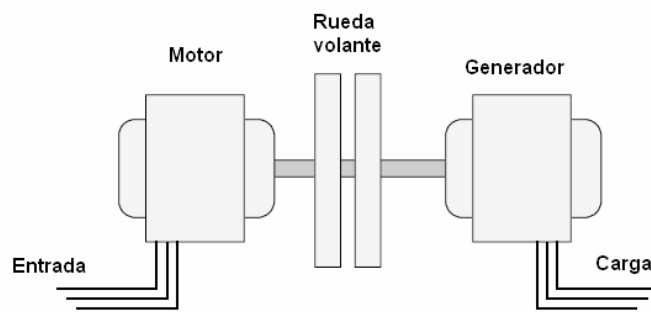
- Rueda volante.
- UPS estática.
- Restaurador dinámico del voltaje.
- Compensador estático de reactivos.
- Conexión de máquina síncrona de respaldo.
- Conexión de transformadores en serie.

Estos sistemas se comparan con respecto a la capacidad de la inmunización del hueco de tensión y a varios parámetros técnicos y económicos. Su comparación se realiza teniendo en cuenta (a) las especificaciones de los equipos, (b) el acondicionamiento de los controles, (c) la protección total dentro de la planta, y (d) soluciones de tipo general.

6.3.1. Rueda volante. Una combinación de rueda volante y motor-generador (un motor de inducción acoplado a un generador síncronico) donde el almacenamiento de la energía se encuentra en la inercia de la máquina, la cual es transmitida a la rueda (volante) acoplada al sistema; puede proteger procesos críticos contra todos los huecos de tensión donde es más corta la duración que el tiempo de la interrupción de la rueda volante, es decir es apropiado para cargas inferiores a 500 Kva y para huecos o cortes breves de menos de 0,5 segundos. Cuando ocurre un hueco, el sistema del motor-generador alimenta la carga, la

energía sigue siendo provista por la rueda volante gradualmente. En la gráfica 11 se muestra un esquema genérico de este dispositivo.

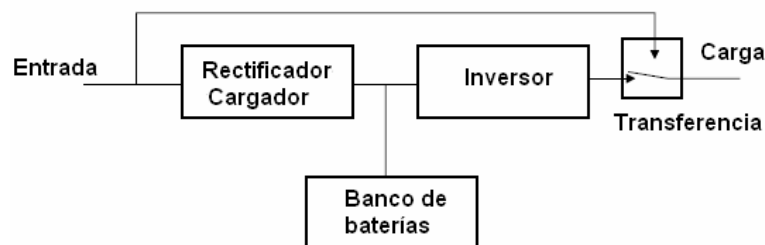
Gráfica 11. Esquema general de una Rueda volante



Fuente: DUNGAN, C Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p. 55.

6.3.2. UPS estática con mínimo almacenamiento de energía. Estos dispositivos son pensados sobre todo para mantener el suministro durante interrupciones de la fuente, proporcionando suficiente ayuda para permitir una parada ordenada de procesos, es decir, son diseñadas para cargas constantes, como computadoras y otros equipos electrónicos. Durante una interrupción, la carga se alimenta desde la batería a través del convertidor de AC/DC (Gráfico 6.2). Cuando la circuitería de la UPS detecta un hueco de tensión, transfiere la carga protegida a unas baterías. La UPS proporciona la potencia mientras la batería o las baterías han almacenado la energía, que puede extenderse de 3 a 20 minutos típicamente. Su rendimiento con cargas dinámicas, como poner en marcha motores grandes, es limitado.

Gráfica 12. Diagrama de bloques de una UPS



6.3.3. Restaurador dinámico de voltaje. El restaurador dinámico de voltaje (Dynamic Voltage Restorer (DVR)) fue introducido comercialmente en 1994. El DVR consiste en: inversor fuente de voltaje, transformadores de inyección, filtros pasivos y un dispositivo de almacenamiento de energía. La eficacia del DVR depende de la eficacia de la técnica del control usada para los inversores. Los inversores son maniobrados usando modulación del ancho de pulsos por vector espacial de pulsos Space (Vector Pulse Width Modulation pulses (SVPWM) para maximizar el uso del enlace de voltaje CD.

Durante un hueco de tensión, el DVR agrega el voltaje que falta a través de un transformador, instalado en serie con la carga. La carga queda conectada con la fuente y el DVR calcula la parte que falta de la forma de onda de la tensión y la corrige. Dependiendo del concepto, la energía para apoyar la carga durante un hueco de tensión se origina de la red o de una unidad adicional de almacenamiento de energía (generalmente un banco de condensadores). El primero, no tiene ningún almacenamiento de energía y está continuamente en línea. Cuando ocurre un hueco de tensión, la energía a generar la diferencia de tensión requerida es retirada de la fuente (como una corriente creciente) y el dispositivo no puede hacer frente a voltajes conservados muy bajos. Este tipo de DVR esta disponible en el comercio con una capacidad de elevación del voltaje hasta del 50%.

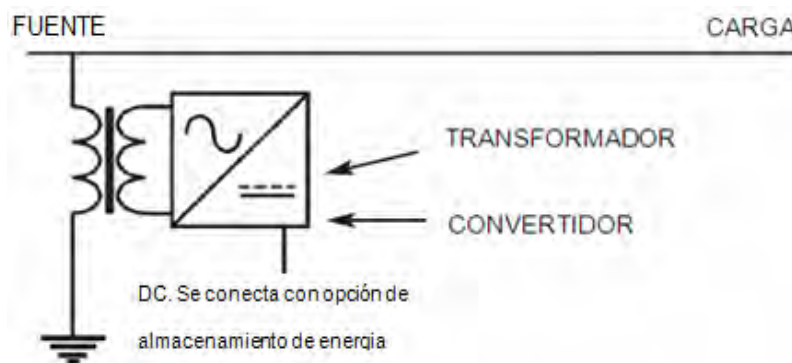
La unidad es clasificada en términos de energía que puede ser inyectada; por lo tanto la capacidad de elevación del voltaje depende de la carga. Ejemplo. Una unidad de 2 MW puede elevar el voltaje de una carga de 4 MW por el 50%, o el voltaje de una carga de 8 MW por el 25%. El tipo de almacenamiento de energía es muy importante.

Los condensadores tienen densidad relativamente baja de almacenaje pero recargan muy rápidamente con objeto del defecto siguiente de la fuente, mientras que las ruedas volantes de alta velocidad tienen densidad grande de la energía pero llevan una recarga relativamente larga.

6.3.4. Conexión de máquina síncrona de respaldo. En aplicaciones industriales las máquinas síncronas son usadas donde es deseada velocidad constante. Una característica importante de estas máquinas es que pueden operar ya sea tomando o entregando potencia reactiva a la red dependiendo del nivel de excitación. La capacidad de la máquina síncrona para proveer corrientes reactivas grandes permite a este sistema levantar el voltaje por el 60%, en menos de 6 segundos. Además, una rueda volante pequeña protege la carga contra cortes hasta de 100 ms. Resulta indicado para cargas menores de 500 Kva.

6.3.5. Compensador estático de reactivos. Un compensador estático de reactivos es un inyector de corriente conectado en paralelo con la carga (Ver Gráfica 13). Este atenúa huecos de tensión, inyectando potencia reactiva en el sistema. La capacidad de la atenuación del hueco de tensión puede ser realizada agregando almacenamiento de energía tal como el superconductor magnético de almacenamiento de energía o (SMES).

Gráfica 13. Diagrama de bloques de un convertidor estático de reactivos



Fuente: DUNGAN, C Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne; Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p 58.

6.3.6. Inyección de transformadores en serie. Este dispositivo consta de un interruptor estático conectado en serie con la carga, dicho interruptor estático, en caso de un hueco de tensión, es abierto y la carga es provista por un inversor. Inyecta una tensión regulada que se añade o sustrae de la existente, en el transformador principal. Alternativamente, el transformador serie puede insertarse en el lado de alta tensión. La situación de este transformador serie en uno u otro lado tiene una serie de ventajas/inconvenientes asociadas a la intensidad que circula por sus devanados y al nivel de aislamiento necesario, que deberán tenerse en cuenta para una adecuada elección. La energía de la barra de D.C. del inversor es mantenida cargando dos condensadores conectados en serie. Para los huecos por debajo del 50% retiene el voltaje y el voltaje clasificado se puede proveer a la carga. Almacenamiento de energía adicional opcional (ej. condensadores adicionales) puede atenuar una interrupción completa por una duración limitada de tiempo y atenuar huecos de tensión asimétricos más profundos, tales como una interrupción completa de una fase. Tres diferentes conceptos para realzar la inmunidad a los huecos de tensión pueden ser identificados:

Concepto a. La carga es provista por una fuente de energía externa. Estos tipos de sistemas (rueda volante y UPS estática) pueden proteger contra todos los huecos de tensión. La duración del tiempo de la protección máxima depende solamente de la cantidad de energía almacenada que puede ser utilizada.

Concepto b. El voltaje es alzado por cierto porcentaje. Estos sistemas (compensador estático de reactivos y DVR) utilizan el voltaje restante en la fuente como punto de partida y agrega el voltaje que falta. Si no pueden restaurar el voltaje nominal de la fuente, utilizan su capacidad máxima. Un hueco de tensión se considera ser atenuado si el voltaje final (voltaje de fuente durante un hueco más voltaje agregado) es lo suficientemente alto para mantener la operación normal de la carga.

Concepto c. La solución protege la carga contra una magnitud predefinida del hueco de tensión. Para conservar un flujo de la potencia constante a la carga, estos tipos de sistemas (ej. inyección de transformadores en serie) compensan el voltaje disminuido dibujando una corriente más alta de la fuente. Por lo tanto, la profundidad máxima del hueco de tensión que puede ser compensada depende del grado actual del equipo de mitigación y del sistema de fuente. Tres parámetros importantes se requieren para conducir un análisis apropiado con respecto a la capacidad de mitigación del hueco de tensión: frecuencia relativa de picos de tensión, huecos de cierta sensibilidad, nivel de inmunización de la profundidad del proceso. La frecuencia relativa de huecos de tensión con cierta profundidad (picos de tensión), al comparar las diversas soluciones preventivas, la frecuencia de los huecos de tensión y la distribución de la probabilidad de las magnitudes de los huecos de tensión son muy importantes. Uno puede imaginarse que una instalación que experimenta 10 huecos por unidad, con un voltaje conservado del 10% requiere una diversa solución a partir de una instalación con un número similar de huecos pero un voltaje conservado del 70%. En la Tabla 8 se muestra un resumen del porcentaje de las paradas de diferentes procesos debido a los huecos de tensión que se pueden evitar por los sistemas descritos. Usando estadística de los huecos de tensión de un estudio realizado por la CIGRE para una barra de distribución en Bélgica, y considerando dos diversos niveles de inmunidad inicial del proceso (-10% y -30%). El porcentaje de paradas evitadas no es afectado por la vulnerabilidad del equipo de proceso a huecos trifásicos a huecos de 1, 2 y 3 fases puesto que se asume que: la distribución relativa de la profundidad del hueco es igual para todos los huecos de tensión (1, 2 y 3 fases) y que todo el equipo protector proporciona la misma protección relativa para estos huecos de tensión. En la tabla vemos como cada dispositivo tiene su propio nivel de inmunización, la elevación máxima permitida del voltaje en cada uno de los dispositivos durante un hueco de tensión; la franja negra nos muestra donde tienen mayor inmunidad inicial cada uno de los diferentes dispositivos de mitigación de los huecos de tensión.

Tabla 8. Porcentaje de cortes reducidos por diferentes dispositivos de mitigación tomando diferentes estadísticas y diferentes inmunidades iniciales de procesos.

Porcentaje de los cortes debido a los huecos de tensión que serán reducidos: 40 - 60% 60 - 80% 80 - 100%	Concepto de la inmunización	Caída de voltaje máxima que es protegida en %	Elevación máxima del voltaje en %	'CIGRE', inmunidad inicial - 10%	'CIGRE' inmunidad inicial - 30%	Barra belga, inmunidad inicial - 10%	Barra belga, inmunidad inicial - 30%
Volante	a	100	/				
UPS Estática	a	100	/				
DVR	b	/	30				
DVR 200% de carga	b	/	50				
DVR 400% de carga	b	/	25				
Compensador estático de reactivos-SMES	b	/	60				
Maniobra de maquina síncrona conectada	b	/	60				
Inyección de transformador es en serie	c	50	/				

Fuente: THONSON, Andrew. Power Quality Application Guide Voltage Disturbances Considerations for Choosing the Appropriate Voltage Sag Mitigation Device Marcel Didden. Baltimore: Laborelec, 2005. p. 18.

7. OBTENCIÓN DE VALORES DE REFERENCIA DE COSTOS DE LAS PÉRDIDAS A CAUSA DE LOS HUECOS DE TENSIÓN EN TRANSFORMADORES Y MOTORES

La Calidad de la Potencia es uno de los temas mas estudiados en la actualidad, especialmente los usuarios que manejan grandes cargas eléctricas, Por esto es de interés que la empresa distribuidora, caracterice su sistema para conocer su desempeño en Calidad de Potencia (aquí se incluyen los huecos de tensión) y pueda ofrecer a sus usuarios o clientes garantías reales de servicio. Sin embargo, la Calidad de Potencia esta afectada por todo el sistema de potencia desde la generación, incluyendo la transmisión y la distribución, ya que el número de eventos producidos en cada uno de estos subsistemas se van acumulando hasta llegar al usuario final, entregando una tensión en la que puede manifestarse la aparición de huecos de tensión en mayor o menor grado.

La búsqueda y la cuantificación del impacto económico de las consecuencias de los huecos de tensión, es una labor ardua y difícil por la escasez de datos que puedan ser validados.

El procedimiento de evaluación económica para encontrar la mejor alternativa con el fin de mejorar el impacto de los huecos de tensión está constituido por los siguientes pasos:

- Caracterizar el comportamiento de los huecos de tensión en el sistema. Se tienen en cuenta las fallas en los sistemas de transmisión y distribución. El número de interrupciones temporales para cada circuito de distribución también se debe calcular.
- Estimar los costos asociados con los procesos y los equipos afectados por los huecos de tensión: pérdida de producción, costos de re-inicio, costos laborales, daños en equipos y reparaciones y otros costos.
- Caracterizar las alternativas de solución en términos de costos y eficacia.

- Llevar a cabo el análisis técnico económico comparativo.

Los pasos anteriores, mostrados de esa manera, parecieran que se tratara de un procedimiento fácil; por el contrario, se trata de una labor bastante difícil.

7.1 CARACTERIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE POTENCIA DEL SISTEMA.

Se incluyen las siguientes actividades generales:

- Seleccionar los equipos de medida adecuados.
- Registrar, evaluar y almacenar la información de las variables de de los huecos de tensión.
- Comprender los tipos de disturbios, la ocurrencia en el sistema y la frecuencia de su ocurrencia.

7.2 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN

Solamente el conocimiento, en detalle, de los procesos afectados por los huecos de tensión permitirá, para cada caso, la correcta estimación de los costos asociados con este fenómeno.

Los costos asociados con huecos de tensión pueden variar significativamente desde cero a varios millones de dólares por evento; solamente en la industria de la producción de Norte América, los costos de los cortes ocasionados por huecos de tensión, exceden los US\$250.000 millones de dólares por año. Este dato estadístico de los costos por la calidad del servicio nos muestra que el problema es serio y hay que buscarle soluciones.

“Un hueco de tensión en una fábrica de papel puede costar cerca de US\$250.000”. Fuente: Busines Week, Junio 17 de 1996.

A continuación se muestran varios ejemplos de costos ocasionados por huecos de tensión en la industria de los Estados Unidos:

- Costo de disturbios por huecos de tensión a fabricantes de Compresores: US\$1, 700, 000/año.
- En la industria papelera, el costo de 2 segundos de interrupción cuesta aproximadamente US\$30,000.
- En la Industria automotriz los huecos de tensión cuestan US\$10.000.000 millones/año.
- Por pérdidas de control en tráfico aéreo cuesta US\$15.000/minuto.

Según The Economics of Custom Power Mark McGranaghan, EPRI PEAC, September 2003, un estimativo de los costos por la mala calidad del servicio por tipo de cliente en Estados Unidos nos muestra que los costos ascienden a los US\$ 79.000 millones de dólares, descompuesto de la siguiente manera:

- Industrial (26%), US\$20.000 millones.
- Residencial (2%), US\$2.000 millones.
- Comercial (72%), US\$57.000 millones.

Un estimativo de los costos por la mala calidad del servicio por tipo de interrupción en Estados Unidos:

- Interrupciones permanentes (menores o iguales a 5 minutos), (33%), US\$27.000 millones.
- Interrupciones momentáneas (mayores a 5 minutos), (67%), US\$52.000 millones.

En Europa existen algunos costos indicativos tales como los que se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. El costo de la mala calidad de la potencia en Europa

Industria	Pérdidas financieras típicas por suceso
Fabricación de semiconductores	3.800.000 Euros
Actividades financieras	6.000.000 Euros/hora
Centros informáticos	750.000 Euros
Telecomunicaciones	30.000 Euros/minuto
Industria siderúrgica	350.000 Euros
Industria del vidrio	250.000 Euros

Fuente: CHAPMAN, David. El coste de una mala calidad de la energía eléctrica. Detroit: Copper Development Association, 2001. p. 142.

El costo no solamente variará entre los diferentes tipos de industria e instalaciones individuales sino también por las condiciones del mercado. Los gastos más altos son típicamente experimentados si el producto final es escaso y hay habilidad limitada para re-iniciar después de la pérdida de producción.

No todos los costos son cuantificados fácilmente o reflejan realmente la urgencia de evitar las consecuencias de un hueco de tensión.

Con base en la metodología establecida por Dungan C. Roger McGranaghan Mrsk F. Santoso Surya Beaty H. Wayne en su libro *Electrical Power Systems Quality*, el costo de un disturbio en la calidad de potencia puede ser captado mejor a través de las siguientes tres categorías:

- Pérdidas relacionadas con el producto. Tales como la pérdida del producto y materiales, pérdidas de la capacidad de producción y el incremento de los inventarios.
- Pérdidas laborales. Se relaciona con la pérdida de empleo, tiempo extra y arreglos laborales.
- Costos auxiliares. Se relaciona como equipo dañado, el costo de oportunidad desperdiciado y penas atribuibles a las demoras de envío.

Los costos variarán típicamente con la gravedad (tanto magnitud como la duración) del disturbio. Esta relación puede definirse por una matriz de factores de peso. Los factores de peso son desarrollados usando el costo de una interrupción momentánea como base.

Generalmente, una interrupción momentánea causará una interrupción a cualquier carga o al proceso que no está protegido específicamente con un tipo de tecnología de almacenamiento de energía. Los huecos de tensión y otras variaciones en la calidad de potencia siempre tendrán un impacto que es una porción de este apagón total.

Si un hueco de tensión al 40% resulta en 80% del impacto económico que una interrupción momentánea causa, entonces el factor de peso para un hueco de tensión al 40% sería 0.8. De forma semejante, si un hueco de tensión al 75%, solamente resulta en 10% de los costos que una interrupción causa, entonces su factor de peso es 0.1.

Después de que los factores de peso son aplicados a un evento, los costos del evento son expresados en por unidad, del costo de una interrupción momentánea. Los eventos ponderados pueden ser sumados y el total, es el costo total de todos los eventos expresados en el número equivalente de interrupciones momentáneas.

La Tabla 10 provee un ejemplo de factores de peso que fueron usados en una investigación. Los factores de peso pueden ser ampliados más para diferenciar entre los huecos de tensión que afectan todas las tres fases y los huecos que solamente afectan una o dos fases.

La tabla 11 combina los factores de peso con el comportamiento esperado para determinar un costo total anual asociado con los huecos de tensión e interrupciones.

El costo es 16.9 veces el costo de una interrupción. Ejemplo. Si una interrupción cuesta US\$40,000, los costos totales asociados con los huecos de tensión e interrupciones serían US\$676,000 por año.

Tabla 10. Ejemplo de factores de peso para diferentes magnitudes de huecos de tensión en Estados Unidos

Categoría por evento	Factor de peso por análisis económico
Interrupción	1.0
Hueco de tensión con tensión mínima por debajo del 50%	0.8
Hueco de tensión con tensión mínima entre el 50% y 70%	0.4
Hueco de tensión con tensión mínima entre el 70% y 90%	0.1

Fuente: DUNGAN, C Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p. 75.

Tabla 11. Ejemplo de combinación de factores de peso con el rendimiento de huecos de tensión esperados para determinar el costo total de las variaciones de la calidad de potencia en Estados Unidos

Categoría por evento	Factor de peso por análisis económico	Numero de eventos por año	Equivalente total de interrupciones
Interrupción	1.0	5	5.0
Hueco de tensión con tensión mínima por debajo del 50%	0.8	3	2,4
Hueco de tensión con tensión mínima entre el 50% y 70%	0.4	15	6
Hueco de tensión con tensión mínima entre el 70% y 90%	0.1	35	3.5
Total			16.9

Fuente: DUNGAN, C Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. p. 75.

En Colombia también existen inquietudes acerca de la forma de calcular los costos de la mala calidad de la potencia. El documento “Valoración de los costos de la calidad del servicio, costos de la energía suministrada y no suministrada”. SEGUNDA JORNADA TÉCNICA DE DISTRIBUCIÓN Consejo Nacional de Operación - ASOCODIS. EEPP (Empresas Públicas de Medellín). Junio de 2005, presenta una metodología en la cual analizan los costos para los clientes y para las empresas de energía.

Los costos para el cliente, por la mala calidad del servicio, consisten en daños en equipos y dispositivos, utilización de equipos adicionales alternos, lucro cesante, pérdidas de producción, penalizaciones por incumplimientos en contratos establecidos y la insatisfacción del cliente final. Los costos para la empresa por el mejoramiento de la calidad de la potencia incluyen AOM, inversiones, reclamaciones, indemnizaciones, compensaciones, etc.

7.3 CARACTERIZAR EL COSTO Y EFICACIA PARA ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Cada tecnología de solución necesita ser caracterizada en términos de costo y eficacia. En términos amplios el costo de solución debe incluir inicialmente la adquisición y los costos de instalación y costos de operación y mantenimiento. Un estudio minucioso incluirá costos menos obvios como bienes raíces o costos de espacio relacionados y consideraciones de impuesto.

El costo de los requerimientos de espacio extra puede ser incorporado como un precio de renta de espacio e incluirse con otros costos de operación anuales.

Las consideraciones de impuesto puede tener varios componentes, y el beneficio neto o el costo pueden también ser incluidos con otros costos de operación anuales. La Tabla 12 provee un ejemplo de costos iniciales y costos de operación anuales para algunas tecnologías en general, usadas para mejorar el rendimiento de los huecos de tensión y las interrupciones. Estos costos no deben ser considerados indicativos de ningún producto especial. Además de los costos, la solución efectiva de cada alternativa necesita ser cuantificada en relación con la mejora de rendimiento que pueda lograrse.

Soluciones efectivas, como costos de la calidad de potencia, variarían típicamente con la severidad del disturbio. Esta relación puede estar definida por una matriz de valores de “% de huecos de tensión evitados”.

La Tabla 12 ilustra este concepto para las tecnologías del ejemplo de la Tabla 10 tal como podrían ser aplicables a una típica instalación industrial.

Tabla 12. Costos típicos de tecnología utilizados para mitigar los efectos de los huecos de tensión.

Categoría por alternativa	Costo típico	Costos de operación y mantenimiento (% de costos iniciales por año)
Proteccion de Controles (< 5 KvA)		
UPS	\$500/KVA	25
Corrector dinámico de huecos de tensión	\$250/KVA	5
Proteccion de Maquinas (10-300 KvA)		
UPS	\$500/KVA	15
Volante	\$500/KVA	7
Corrector dinámico de huecos de tensión	\$200/KVA	5
Proteccion de Carga Instalada (2-10 MVA)		
UPS	\$500/KVA	15
Volante	\$500/KVA	5
DVR (50% de tensión de excitación)	\$300/KVA	5
Interruptor estático (10MVA)	\$600.000	5
Interruptor de transferencia rápida (10MVA)	\$150.000	5

Fuente: MCGRANAHAN, Mark; ROETTGER, Bill. "Economy Evaluation of Power Quality" IEEE Power Engineering Review. Boston: Isa Editor, 2002. p.15.

7.4. COMPARATIVO PARA LLEVAR A CABO EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO

El proceso de comparar las diferentes alternativas para mejorar el rendimiento supone determinar el costo anual total para cada alternativa relacionados con huecos de tensión (recordar que las soluciones típicas no eliminan los costos completamente) y los costos anualizados de implementación de la solución. El objetivo es minimizar estos costos anuales.

Comparando las alternativas de solución de calidad de potencia en términos de sus costos totales anuales (costos de calidad de potencia + costos anuales de solución de calidad de potencia) identificamos en éstos las soluciones con más bajo costo que justifique investigaciones mas detalladas. La solución más fácil es

generalmente incluida en el análisis comparativo y es identificada típicamente como el caso base. La solución más fácil tiene un costo anual de cero para la solución de calidad de potencia pero tiene los más altos costos de calidad de potencia anuales.

Finalmente es de gran importancia conocer la sensibilidad de los equipos a los huecos de tensión en determinado tipo de industrias para poder hacer frente a ellos minimizando sus consecuencias.

Por otra parte, el IEEE Std 1346-1998⁶ recomienda una metodología para el análisis técnico y económico de la compatibilidad a los huecos de tensión entre los equipos de procesamiento electrónico y el sistema eléctrico.

Muchos negocios no tienen un método formal para registrar el tiempo de un corte imprevisto de la producción a causa de un hueco de tensión pues cada operario está “demasiado ocupado” tratando de que la producción vuelva a continuar. Por lo tanto no es sorprendente que muchos de estos negocios no tengan ninguna estimación exacta del costo de tal acontecimiento e incluso no saben cuál es el impacto anual en el negocio.

⁶ THONSON, Andrew. Power Quality Application Guide Voltage Disturbances Considerations for Choosing the Appropriate Voltage Sag Mitigation Device Marcel Didden. Baltimore: Laborelec, 2005. p. 89.

8. CONCLUSIONES

El riesgo de la empresa planteado por los problemas de calidad de potencia es uno de los problemas más reales a los que son expuestas las industrias siendo a la vez expuestas a pérdidas financieras serias.

La previsión empleando métodos preventivos y correctivos constantemente, se convierte en el mejor método para disminuir el impacto de los huecos de tensión.

No cabe duda que los huecos de tensión son perturbaciones a la calidad de la potencia, por lo tanto, es necesario realizar un estudio del impacto económico que generan esas perturbaciones.

Se analizó el efecto que los huecos de tensión tienen para el cliente residencial y las consideraciones que debe tener en cuenta la empresa de servicios para mejorar o sostener la calidad del servicio.

Se presentaron algunos modelos teórico y práctico que determinan los costos para los clientes finales y para las empresas de distribución por la calidad del servicio.

9. RECOMENDACIONES

La UAO, a través del Programa de Ingeniería Eléctrica, debería avanzar en la investigación de esta temática, acometiendo proyectos tales como:

- Diseño y construcción de un generador de huecos de tensión.
- Medición y análisis de los efectos de los huecos de tensión sobre transformadores, motores y equipo de cómputo a nivel de PCs.
- Interrelación con las empresas distribuidoras, en este caso EPSA y EMCALI, con el objeto de analizar el origen y los efectos de los huecos de tensión.
- Interrelacionar con la industria (grande, mediana y pequeña) y los sectores comerciales para el análisis del impacto económico como consecuencia de los huecos de tensión.
- Teniendo en cuenta que en las instalaciones de la UAO se presentan bastantes disturbios en sus instalaciones eléctricas, debería realizarse estudios entre la Universidad y EMCALI, en la solución definitiva del problema. ¿Qué tanto puede aportar EMCALI? ¿Qué tanto puede aportar la UAO?
- Fomentar la creación de foros de discusión acerca de los huecos de tensión y, en general, sobre los problemas de la calidad de la potencia.
- Decidir actuar sobre las instalaciones en las zonas con alto índice de fallas; por ejemplo, resolviendo problemas de contaminación, nieblas, mal estado de los materiales, etc.

Alguna Medidas que puede adoptar el cliente son:

- Prever un buen sistema de protecciones que soporte los huecos de tensión y que me reduzca en lo posible el tiempo de eliminación de las fallas.
- Inmunizar la instalación.

BIBLIOGRAFIA

BOLLEN, M.; STYVAKTAKIS, E. Characterization of three. Phase unbalanced dips Power. Atlanta: Engineering Society Summer Meeting, 2000. 404 p.

CHAPMAN, David. El coste de una mala calidad de la energía eléctrica. Detroit: Copper Development Association, 2001. 322 p.

DOLATIAN, M. R.; A. JALILIAN, A. Voltage Sag Effect on Three Phase Five Leg Transformers. Computer and Systems Engineering. Vol. 19, No. 2 (Ene – May 2000). 180 p.

DUNGAN, Roger; MCGRANAGHAN, Msrk F.; SANTOSO Surya; BEATY H, Wayne. Electrical Power Systems Quality. Miami: McGraw-Hill, 2002. 292 p.

GUASCH PESQUER, Luis; CÓRCOLEZ LÓPEZ, Felipe. Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y transformadores Trifásicos. Barcelona: Paraninfo, 2006. 210 p.

MCGRANAHAN, Mark; ROETTGER, Bill. "Economy Evaluation of Power Quality" IEEE Power Engineering Review. Boston: Isa Editor, 2002. 270 p.

MAZÓN, A. J.; ZAMORA, I.; ANTEPARA, F.; MANTEGUI, J. A.; SAENZ J. R. Proyecto de diseño e instalación de una bobina Petersen como sistema de puesta a tierra para mejorar la calidad del suministro eléctrico. Dpto. de Ingeniería Eléctrica E. S. Bilbao: Iberdrola S.A., 2001. 385 p.

PÉREZ, John J.; CORTÉS, Camilo A.; GÓMEZ, Álvaro. A study of voltage sags in electric motors. Bogotá: Universidad de La Salle, 1999. 450 p.

THONSON, Andrew. Power Quality Application Guide Voltage Disturbances Considerations for Choosing the Appropriate Voltage Sag Mitigation Device Marcel Didden. Baltimore: Laborelec, 2005. 170 p.